

顾及三维的大冶市建设用地扩张及其生态效应

陈勇^{1,2}, 阮景华¹, 王巧稚^{1,2}, 肖晓¹, 曾向阳^{1,2}

(1. 武汉科技大学 资源与环境工程学院, 武汉 430081; 2. 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室, 武汉 430081)

摘要: 三维地形起伏影响着广泛的景观生态格局、过程及其动态。利用遥感影像和 DEM 数据, 基于地形起伏度和坡度将大冶市划分为平畈、缓丘、陡丘和低山 4 种地貌类型区域, 考虑三维地形对生态系统服务功能的影响, 建立了顾及三维的生态系统服务价值估算修正模型, 同时引入 3D 景观格局指数来共同探讨建设用地扩张及其生态效应。结果表明: (1) 1995—2015 年, 大冶市建设用地扩张存在逐渐加速的趋势, 平畈和缓丘区域扩张强烈, 且边缘式扩张模式占有优势地位, 而陡丘和低山区域扩张较为缓慢, 且边缘式、填充式和飞地式扩张三足鼎立; (2) 1995—2015 年, 大冶市建设用地扩张带来的生态服务价值总损失为 37 525.56 万元, 平畈和缓丘区域因占地多而总损失量大, 但缓丘和低山区域单位建设用地扩张代价更高; (3) 从 1995 年、2005 年、2015 年的 3D 景观格局指数变化看, 大冶市建设用地扩张导致各地貌类型区域的景观破碎程度均持续增加, 在平畈和缓丘区域, 新增建设用地与原有建设用地的连通性开始改善, 但平畈区域的景观均衡性后期开始减弱, 缓丘区域的景观均衡性则持续增强, 陡丘和低山区域新增建设用地团聚程度低, 林地的主导地位开始削弱。

关键词: 空间格局变化; 扩张模式; 生态效应; 三维信息

中图分类号: K903

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)05-0346-07

Expansion of Construction Land and Its Ecological Effect Based on Three-Dimension Information in Daye

CHEN Yong^{1,2}, RUAN Jinghua¹, WANG Qiaozhi^{1,2}, XIAO Xiao¹, ZENG Xiangyang^{1,2}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. Hubei Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic mineral Resources, Wuhan 430081, China)

Abstract: Topographic fluctuations widely affect the patterns, processes and dynamics of landscape ecology. Based on remote sensing images and DEM data the topographic fluctuation and slope, Daye City was divided into four types of landform: flats, gentle hills, steep hills and low mountains. This paper considered the effects of three-dimensional terrain on ecosystem services from the topographic fluctuation and aspect, established a three-dimensional ecosystem service value estimation model, and introduced 3-D landscape pattern index to discuss the expansion of construction land and its ecological effects. The results show that: (1) from 1995 to 2015, the expansion of construction land in Daye City accelerated gradually, the expansion in flat and gentle hill areas was strong, and the extension mode occupied a dominant position, while the expansion in steep hills and low mountain areas was relatively slow, and the expansion, infilling and isolation modes show a three-pillar situation; (2) from 1995 to 2015, the total loss of ecological service value caused by the construction land expansion in Daye City was 375.256 million yuan, and the total loss in flat and gentle hill was large because of the large occupation of land, but the cost of unit occupation land in gentle hill and low mountain areas was higher; (3) from the change of 3-D landscape pattern index in 1995, 2005 and 2015, construction land expansion in Daye City has led to the continuous increase of landscape fragmentation in the whole region; in flat and gentle hills, the connectivity between new construction land and existing construction land

收稿日期: 2018-11-26

修回日期: 2018-12-18

资助项目: 国家自然科学基金“生态工业协调网络演化及效应机制研究”(43008101)

第一作者: 陈勇(1968—), 男, 湖南永州人, 教授, 博士, 从事矿区生态安全研究。E-mail: yongchen1968@163.com

通信作者: 王巧稚(1983—), 女, 湖北荆门人, 博士, 从事生态与环境政策研究。E-mail: wangqiaozhi@wust.edu.cn

was improving, but the landscape balance of flat began to weaken in the later stage, while the landscape balance of gentle hill continued to enhance; in steep hills and low mountain, the aggregation of new construction land was low, and the dominant position of forest land began to weaken.

Keywords: spatial pattern change; expansion mode; ecological effect; three-dimension information

工业化和城市化带来的生态环境问题一直是国际社会关注的焦点。针对城市化过程中建设用地扩张及其生态环境效应的研究已较为广泛,主要集中在建设用地扩张特征、扩张模式、驱动机制和模拟模型研究^[1],以及扩张引发的大气、水、土壤等环境要素效应和景观生态格局、物质能量循环、生态服务价值变化等综合生态效应研究^[2]。由于研究数据多采用遥感影像投射到二维笛卡尔空间上形成的平面数据进行,使得区域复杂自然地貌分异和三维空间特征较少在研究中得以体现,从而影响分析结果的客观性和实用性。

矿业城市是指因矿产资源的开发而兴起或发展,且在一段时期内矿业在城市产业结构中占据主导地位的城市。矿产资源开发推动了区域城市化进程,据统计,我国矿业城镇数量超过 400 个,县级以上矿业城市就有 99 个,矿业城市已成为我国城镇体系的重要组成部分。

大冶市是我国中南地区典型的矿业城市,位于 114°31′—115°20′E, 29°40′—30°15′N,地处鄂东南丘陵北缘和湖北省冶金走廊腹地,全市土地总面积 1 566.3 km²,属典型的大陆性季风气候。大冶矿产资源丰富,已发现和探明的大小矿床 273 处,是我国重要的铜、铁矿生产基地。本文基于大冶市 1995 年、2005 年、2015 年三期遥感影像解译结果,叠加数字高程模型,分析不同地貌类型上建设用地扩张的空间差异,并利用三维地形信息对传统的生态系统服务基准单价和景观格局指数进行修正,用修正值测算建设用地扩张带来的生态服务价值效应和景观格局效应,为大冶市土地资源有效管理和生态安全维护提供参考依据。

1 数据来源与处理

数据来源于中科院地理空间数据云提供的 30 m 空间分辨率 DEM 数据和 1995 年 10 月、2005 年 11 月、2015 年 10 月三期 Landsat 影像,以 2010 年土地利用现状图和研究区相关数据作为补充信息。利用 ENVI 软件对影像进行辐射校正、大气校正、配准、裁剪等预处理,利用武鹏飞等^[3]提出的三指数合成法进行波段合成来加强建设用地光谱特征,采用监督分类法对研究区的土地利用类型按照耕地、林地、草地、建设用地、水域和未利

用地 6 种地类进行分类,借助其他相关数据信息对分类后的结果进行修正,得到研究区 3 个阶段的土地利用类型空间分布数据。通过生成随机点与 Google Earth 影像对比验证,最终 3 个时期的总体分类精度均在 80% 以上, Kappa 系数也均在 0.77 以上。

2 建设用地扩张分析

2.1 自然地貌分类

合理的地貌分类体系是科学划分地貌的基础,中国科学院地理所 1978 年主持编制的《中国 1:1 000 000 地貌图制图规范(试行)》^[4],采用海拔和地形起伏度将我国地貌划分为 18 个基本形态类型,对大区域尺度地貌分类具有指导意义。众多研究表明,在中小尺度区域应用时,应结合当地实际情况确定地貌划分体系,如《湖北农业地理》^[5]依据海拔、地表形态和组成物质将江汉平原划分为平原湖区、平缓岗地和起伏丘陵 3 种地貌类型。鉴于大冶市海拔差异不大(最高海拔 839.19 m,最低海拔 11 m),海拔对区域土地利用的限制较小,这里采用地形起伏度和坡度来划分地貌类型(图 1)。

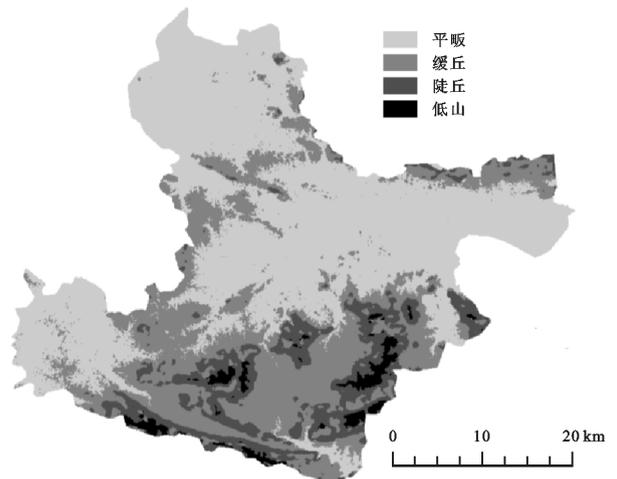


图 1 大冶市地貌类型分布

地形起伏度指地表一定范围内最高点与最低点的高程差,值的大小与领域选择密切相关,根据郎玲玲等^[6]的研究,起伏度随着统计单元面积的增大快速增加,到达一定阈值后增速开始减缓,由陡变缓的拐点对应的值即为最佳统计单元,本文采用均值变点法计算这一阈值,最终确定 12×12 邻域为大冶市地势

起伏度最佳统计单元,在 ArcGIS 软件支持下得到大冶市地形起伏度;常用的坡度算法有 4 块法、空间矢量分析法、拟合平面法、拟合曲面法和直接求解法等 5 种,实践表明,拟合曲面法是求解坡度的最佳方法^[7],本文利用拟合曲面法计算坡度。

针对大冶市自然地貌分异规律和当地习俗称谓,综合熟悉当地情况专家的意见,将大冶市自然地貌划分为平畈、缓丘、陡丘和低山 4 种类型。其中:平畈指地形起伏度小于 50 m 的区域;缓丘指地形起伏度介于 50~500 m,且坡度小于 20 度的区域;陡丘指地形起伏度介于 50~500 m,且坡度大于 20 度的区域;低山指地形起伏度大于 500 m 的区域。经 GIS 分析和统计,平畈、缓丘、陡丘和低山 4 类地貌的面积分别为 880.32 km², 475.85 km², 175.5 km², 34.63 km²。

2.2 建设用地时空变化分析

2.2.1 数量变化 本文引入建设用地比重、年均扩张面积指数 SI 和年均增长率指数 SR 等 3 个指标定量表达建设用地数量变化特征。其中,SI 用来表征建设用地面积变化的数量,SR 用来表征建设用地面积变化的速度,计算公式分别如下:

$$SI = \frac{S_e - S_s}{d} \quad (1)$$

$$SR = \left[\left(\frac{S_e}{S_s} \right)^{1/d} - 1 \right] \times 100\% \quad (2)$$

式中: S_s 、 S_e 分别表示研究单元某一时期初始时间和结束时间的建设用地表面积; d 为时间间隔。

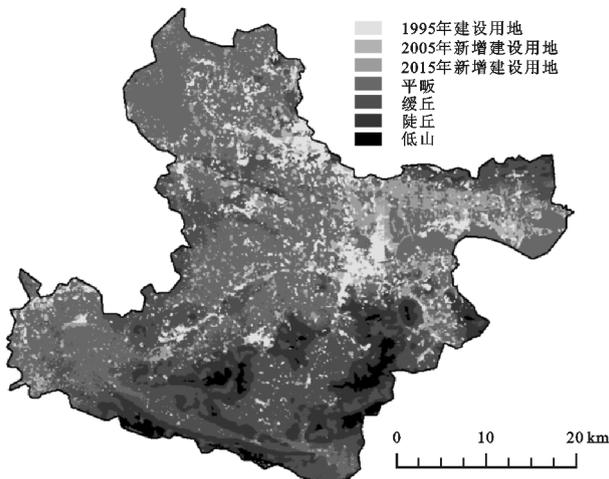


图2 建设用地空间扩张分布

经统计(表 1),大冶市 1995 年、2005 年和 2015 年的建设用地面积分别为 129.15 km², 159.33 km², 236.46 km²,建设用地比重从 1995 年的 8.25% 上升到 2015 年的 15.11%,增长了 1.8 倍。其中,1995—2005 年、2005—2015 年两个阶段的 SI 分别为 3.02 km²/a 和 7.91 km²/a,SR 分别为 2.12% 和 4.11%。

均是后一阶段大于前一阶段,说明大冶市建设用地呈现出加速扩张的态势(图 2)。

按地貌类型统计,1995—2005 年大冶市平畈区域建设用地增加了 23.16 km²,SI 为 2.32 km²/a,SR 为 2.18%;缓丘区域建设用地增加了 6.91 km²,SI 为 0.69 km²/a,SR 为 2.02%;陡丘区域建设用地增加了 0.10 km²,SI 为 0.01 km²/a,SR 为 0.56%;低山区域建设用地增加了 0.01 km²,SI 为 0.001 km²/a,SR 为 0.25%。2005—2015 年平畈区域建设用地增加了 63.13 km²,SI,SR 分别为 6.31 km²/a,4.34%;缓丘区域建设用地增加了 15.51 km²,SI,SR 分别为 1.55 km²/a,3.47%;陡丘区域建设用地增加了 0.48 km²,SI,SR 分别为 0.05 km²/a,2.37%;低山区域建设用地增加了 0.01 km²,SI,SR 分别为 0.001 km²/a,1.94%。平畈区域建设用地扩张表现最为强烈,其扩张面积占总扩张面积的比重达 78.9%,且有不断增大的趋势;缓丘区域扩张面积占总扩张面积的比重达 20.5%,但有逐步减小的趋势;陡丘和低山区域受地形的影响,扩张较为缓慢(图 3)。

表 1 不同地貌类型上建设用地面积 km²

年份	平畈	缓丘	陡丘	低山	总计
1995 年	96.17	31.23	1.71	0.04	129.15
2005 年	119.33	38.14	1.81	0.05	159.33
2015 年	182.46	53.65	2.29	0.06	238.46

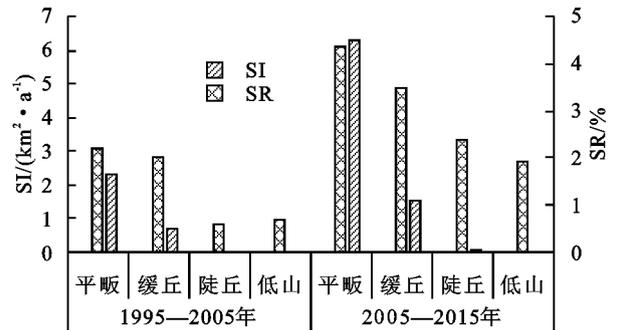


图3 不同地貌类型上建设用地扩张情况

2.2.2 空间特征 本文采用武鹏飞^[8]提出的景观扩张指数 LEI 来定量识别建设用地的空间扩张模式,LEI 的计算公式如下:

$$LEI = \frac{A_o}{A_o + A_v} \times 100\% \quad (3)$$

式中: A_o 为新增建设用地斑块生成的 30 m 缓冲区内原有建设用地斑块面积; A_v 是缓冲区内除去原有建成区斑块剩余的面积;如果 $LEI \geq 50$,那么该新增斑块为填充式扩张,即新增建设用地斑块填充在原有建设用地斑块内部;如果 $0 < LEI < 50$ 为边缘式扩张,即新增建设用地斑块沿原有建设用地斑块的边缘扩

展; 如果 LEI=0 则新增斑块为飞地式扩张, 即新增建设用地斑块与原有建设用地斑块分离。

1995—2015 年, 大冶市建设用地扩张主要以边缘式为主, 填充式为辅, 边缘式、填充式和飞地式扩张的比重分别为 64.7%, 25.0% 和 10.3%。其中, 平畈区域边缘式

扩张表现最为明显, 其边缘式、填充式和飞地式扩张的比重分别占 66.3%, 23.7% 和 10.0%; 缓丘区域次之, 但也是以边缘式扩张为主, 其边缘式、填充式和飞地式扩张的比重分别占 57.8%, 30.4% 和 11.8%; 陡丘和低山区则 3 种扩张方式的数量差异不大(图 4)。

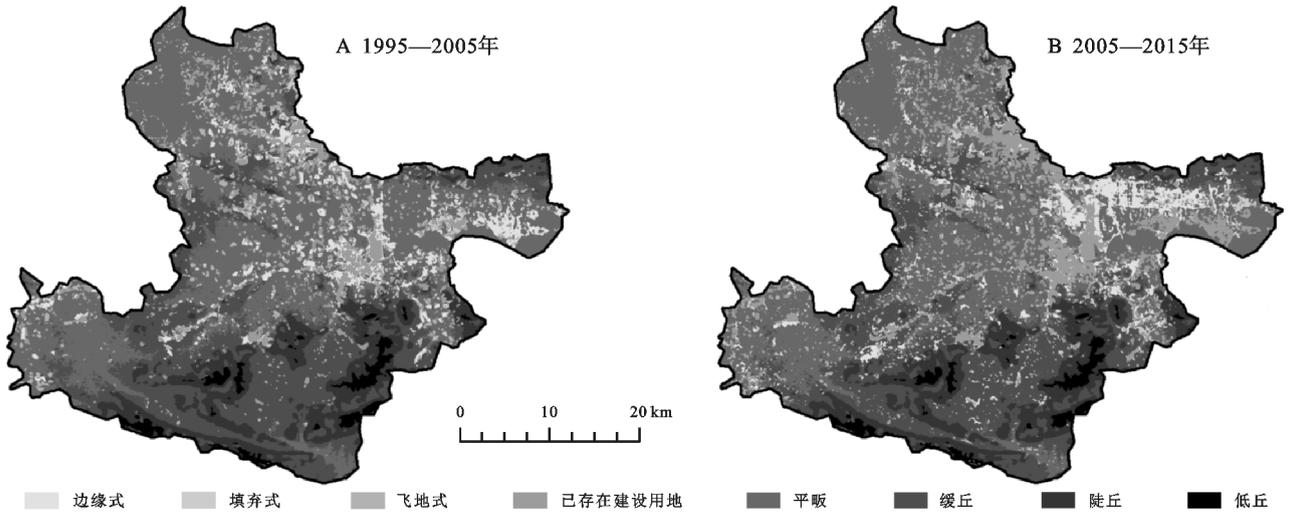


图 4 建设用地扩张模式空间分布

从 1995—2005 年和 2005—2015 年两个阶段看, 大冶市平畈区域边缘式、填充式和飞地式扩张从 1995—2005 年的 70 : 23 : 7 变为 2005—2015 年的 65 : 24 : 11, 缓丘区域则从 62 : 20 : 18 变为 56 : 35 : 9, 边缘式扩张虽然仍是大冶市建设用地扩张的最主要方式, 但所占比重在逐渐减小, 填充式和飞地式扩张开始增多(图 5)。

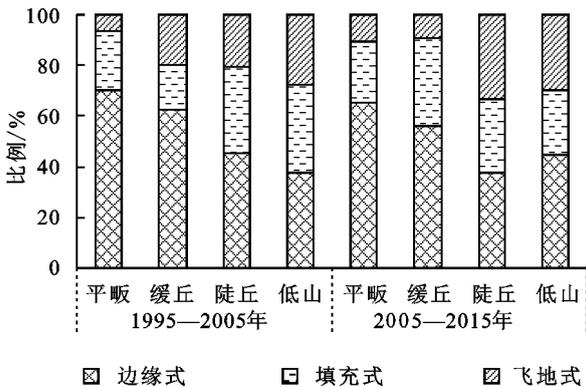


图 5 不同地貌类型上建设用地扩张模式比例

2.2.3 简要评述 建设用地扩张受地形影响, 平畈和缓丘交通便利, 有利于建设用地发展, 其中大冶市东北部还地桥镇、罗家桥街道、东岳路街道以及汪仁镇建设用地扩张显著, 这是由于 1992 年成立了湖北黄石经济开发区, 2010 年正式升级为国家级经济技术开发区, 技术和信息在此处集中, 科技创新平台在此处建立, 高新技术、高新人才在此处聚集, 经济发展势头迅猛, 并且向周边区域扩散, 建成了劲牌工业园、罗桥工业园和城西北工业园为主的三大园区, 因此,

20 a 间, 大冶市东北部建设用地增长剧烈。

在城市增长相位理论中, 认为城市的发展主要包括两种相位: 扩散和聚合。如果以城市增长相位理论对应 3 种扩张模式, 飞地式增长可视作扩散, 而填充式和边缘式增长则可视作聚合的过程。1995—2015 年, 大冶市平畈和缓丘区域建设用地整体处于聚合的过程, 但同时为了进一步发展经济寻找新用地增加了飞地式扩张的面积和分布, 虽然飞地式增长可能带来新的发展机会, 但是盲目应用会造成城镇的无序蔓延, 导致资源浪费, 产生一系列生态环境问题; 陡丘和低山受地形影响, 建设用地无法形成紧凑的增长形态。

3 建设用地扩张生态效应

生态效应指人为活动造成的环境污染和环境破坏引起生态系统结构和功能的变化。本文从生态系统服务和景观格局两个角度来探讨建设用地扩张所产生的生态效应。

3.1 生态系统服务效应

生态系统服务价值估算大都借鉴 Costanza 提出的生态系统服务价值计算公式^[9]:

$$ESV = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n VC_{ij} \times A_j \quad (4)$$

式中: ESV 为研究区生态系统服务总价值; VC_{ij} 为 j 类生态系统 i 类生态系统服务基准单价; A_j 为 j 类生态系统面积。

谢高地等^[10]结合中国国情对 Costanza 式中生态系统服务基准单价 VC_{ij} 进行了修正,提出了中国陆地生态系统单位面积服务价值当量表。实践中,国内研究者多根据研究区域的具体情况,利用植被净初级生产力(NPP)、降水、GDP 指数、居民消费价格指数、平均粮食单产市场价值等对当量因子表进行国家到研究区的修正^[11]。三维地形是最基本的自然地理要素,影响着地表物质、能量的分配和土壤、植被的形成和发育过程,相同面积的地块,其生态服务价值量会因地形部位不同而产生差异。同时,传统利用遥感数据来分析土地利用/覆被变化时往往忽略了实际面积与投影面积的差别,在地形起伏较大的区域,地表面积与投影面积间的差异不可忽略。基于此,本文采用地表面积代替投影面积,引入地形修正因子对生态系统服务基准单价进行修正,建立估算模型如下:

$$ESV = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n VC_{ij} \times S_j \times \alpha_j \quad (5)$$

式中: α_j 为 j 类生态系统地形修正因子; S_j 为 j 类生态系统地表面积。

3.1.1 地表面积计算 常规方法所用的面积一般是垂直投影后的面积,而实际上地形是一个曲面,与投影面有很大差别。将投影面与曲面划分为无数个栅格,每个栅格内曲面可以看成一倾斜面,单位栅格倾斜面积与投影面积的关系式可表示为

$$S_i = S_0 / \cos\theta_i = S_0 \times \sec\theta_i \quad (6)$$

式中: S_i 为单位栅格倾斜面积; S_0 为单位栅格投影面积; θ_i 为倾斜面与投影面的夹角,即坡度。

假定研究区域内共有 n 个栅格数据,根据投影面积与栅格面积的关系,单位栅格倾斜面面积与栅格面积的关系,以及曲面表面积与单位栅格倾斜面面积的关系可以表示为:

$$S_p = n \times S_0 \quad (7)$$

$$S_a = \sum_{i=1}^n S_i = S_0 \times \sum_{i=1}^n \sec\theta_i = S_p \times \sum_{i=1}^n \sec\theta_i / n = S_p \times (\sec\theta_i)_{mean} \quad (8)$$

式中: S_p 表示研究区投影面积; S_a 表示地表面积。曲面面积等于其投影面积与所有栅格倾斜面坡度正割值平均值的乘积。当地形起伏变化剧烈、坡度仰角增大时,坡度正割值也增大,曲面表面积与投影面积的差异就越显著。

3.1.2 单位面积生态系统价值当量修正 地形起伏对于生态系统有着重要影响。一方面,地形起伏影响植被类型与分布;另一方面,影响地面径流变化,从而

影响土壤侵蚀量,起伏越大,阻力系数增大,径流沿程损失增大,从而削弱径流侵蚀力。植被、水流、土壤等因素的综合作用,改变了区域内各组成部分的生态关系从而造成不同地形起伏度上相同面积的同类生态系统的服务价值量不同。

坡向对于山地生态有着较大的作用。一方面,山地的方位影响着日照时数和太阳辐射强度,阳坡和阴坡在温度、植被等方面的差异常常是很大的;另一方面,坡向对降水的影响也很明显,由于一山之隔,降水量可相差几倍。由于光照、温度、雨量、风速、土壤质地等因子的综合作用,坡向能够对植物产生影响,从而引起植物和环境的生态关系发生变化。

基于上述分析,本文从地形起伏度、坡向两个方面构建地形修正因子对耕地、林地、草地生态系统服务基准单价进行修正。水域和建设用地生态系统服务受地形影响较小,其地形修正因子均取值 1。未利用地生态系统服务价值总体不高,这里忽略地形因素的影响,其地形修正因子也取值 1。

地形因子修正模型计算公式如下:

$$\alpha = P_1 x_{ai} + P_2 y_{bi} \quad (9)$$

式中: x_{ai} 表示第 i 级地形起伏度修正因子; y_{bi} 表示第 i 级坡向修正因子; P_1, P_2 分别表示各修正因素的权重, $P_1 = P_2 = 0.5$ 。

地形起伏度、坡向主要影响植物的长势和丰富度,因此本文基于研究区植被覆盖指数来确定每一级地形起伏度、坡度的修正因子。将地形起伏度小于 50 m,坡向为平地的区域修正因子分别定为 1,其他级别的地形起伏度、坡向的修正因子的值则为对应级别的区域平均植被覆盖度与地形起伏小于 50 m 或坡向为平地的区域平均植被覆盖度的比值,计算公式如下:

$$x_{ai} = \frac{\overline{N_{ai}}}{\overline{N_{a1}}} \quad y_{bi} = \frac{\overline{N_{bi}}}{\overline{N_{b1}}} \quad (10)$$

式中: $\overline{N_{ai}}$, $\overline{N_{bi}}$ 分别表示第 a_i 级地形起伏度,第 b_i 级坡向所对应区域的平均植被覆盖度; $\overline{N_{a1}}$, $\overline{N_{b1}}$ 分别表示第 a_1 级地形起伏度、第 b_1 级坡向所对应区域的平均植被覆盖度。

将地形起伏度、坡向分别与植被覆盖度图层叠加,计算各修正因子值如表 2,3 所示。

表 2 地形起伏度修正因子

地形起伏度	级别	修正因子
<50 m	a_1	1.000
50~500 m	a_2	1.530
>500 m	a_3	1.703

表 3 坡向修正因子

坡向	级别	修正因子
平地	b ₁	1.000
南	b ₂	1.213
东南坡、西南坡	b ₃	1.156
东坡、西坡、东北坡、西北坡	b ₄	1.093
北	b ₅	1.063

3.1.3 生态系统服务价值损失估算 参考程建等^[12]

对长江流域不同陆地生态系统单位面积生态服务价值当量的研究, 结合上述三维地形修正后的生态系统服务价值估算模型, 得到研究区 1995 年、2005 年和 2015 年的各类地貌上生态系统服务价值损失量。

1995—2015 年, 大冶市建设用地扩张带来的生态服务价值总损失为 37 525.56 万元, 其中, 平畈区域损失 27 038.25 万元, 缓丘区域损失 10 381.63 万元, 陡丘和低山区域因为占地面积较小, 损失也很小。考察单位面积建设用地扩张造成的损失, 平畈区域为 311 万元/km², 缓丘区域为 456 万元/km², 陡丘区域为 341 万元/km², 低山区域为 476 万元/km², 缓丘和低山区域建设用地扩张的代价更高, 这与平畈区域建设用地主要占用耕地和林地, 缓丘区域主要占用林地和耕地, 陡丘区域主要占用草地和林地, 低山区域主要占用了林地有关(图 6)。

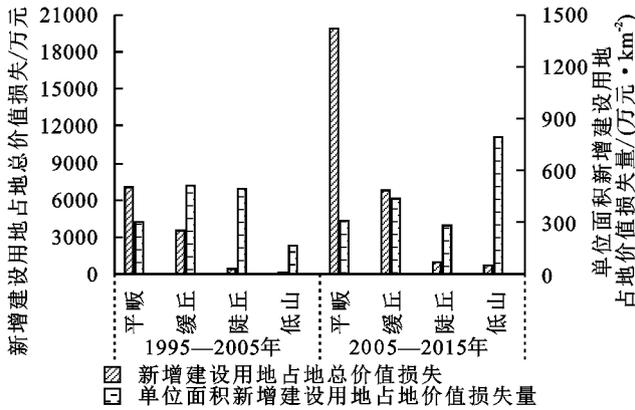


图 6 不同地貌类型上新增建设用地占地生态系统服务价值损失

从 1995—2005 年、2005—2015 年两个阶段看, 受建设用地扩张加速的影响, 生态服务价值损失在整体和各类地貌区域上均表现出相应扩大的趋势。平畈区域由于占用水域的比例有所提高, 单位面积建设用地扩张造成的损失加大; 缓丘区域则由于占用耕地的比例开始提高, 而占用林地的比例有所降低, 单位面积建设用地扩张造成的损失减小。

3.2 景观格局效应

建设用地扩张势必会导致景观单元的类型、数量以

及空间分布上的变化, 即景观格局的变化, 通常利用景观指数来定量表征这些变化, 但传统的二维景观格局指数以二维遥感影像作为数据源, 忽略了地形对景观格局的影响, 造成了三维结构生态学意义的缺失。

基于此, 本文从景观水平选择了 5 个指数: 平均斑块面积(MPA)、平均最小邻近距离(MENN)、蔓延度指数(CONTAG)、香农多样性指标(SHDI)、香农均一度指数(SHEI), 采用上节介绍的方法计算各景观斑块的表面积, 斑块表面周长的计算原理与面积类似, 首先提取各斑块的边界线, 然后将矢量的斑块边界线与 DEM 数据结合计算出斑块各边界的表面长度, 最后加和求得各斑块的表面周长。根据各斑块的表面面积, 表面周长及相关计算公式, 可以算出各 3 D 景观指数, 计算结果见表 4。

从 MPA 和 CONTAG 来看, 平畈和缓丘区域总体小于陡丘和低山区域, 说明平畈和缓丘区域景观破碎程度较高。1995—2015 年, 各类地貌区域 MPA 和 CONTAG 值均持续减小, 说明建设用地扩张导致大斑块数量减少, 小斑块数量增多, 景观的破碎程度增加。

表 4 不同地貌类型上三维景观格局指数变化情况

地貌类型	年份	MPA/ hm ²	MENN/ m	CONTAG/ %	SHDI	SHEI
平畈	1995	15.9913	196.5732	67.2817	1.0268	0.5277
	2005	14.8719	228.3485	66.2513	1.0724	0.5511
	2015	14.5896	194.5015	66.7426	1.0406	0.5348
缓丘	1995	10.0749	233.0394	68.6361	0.9807	0.5040
	2005	9.9410	247.1483	66.8532	1.0393	0.5341
	2015	8.4276	212.4109	63.8914	1.1255	0.5784
陡丘	1995	30.3770	528.1994	89.2144	0.3094	0.1727
	2005	29.1479	528.8276	88.8267	0.3532	0.1815
	2015	28.5611	540.1885	86.5327	0.3970	0.2215
低山	1995	29.1893	488.5806	93.8455	0.1633	0.1612
	2005	28.1434	488.9603	90.2543	0.2457	0.1797
	2015	19.1085	498.1059	83.8677	0.4411	0.2062

从 MENN 来看, 平畈和缓丘区域明显小于陡丘和低山区域, 说明平畈和缓丘区域同类型斑块间距近, 呈团聚分布, 而陡丘和低山区域由于林地斑块面积大, 分布广, 导致其他类型斑块间距离较远。1995—2015 年, 平畈和缓丘区域 MENN 值先增大后减小, 说明 1995—2005 年建设用地对其他类型斑块的占用导致同类型斑块距离的增大, 而 2005—2015 年新增的建设用地与原有建设用地有很好的连接性, 增加了团聚程度; 陡丘和低山区域 MENN 值在 1995—2005 年几乎没有变化, 说明新增建设用地对

原有格局影响不大,而 2005—2015 年 MENN 值开始变大,说明新增的建设用地团聚程度低。

从 SHDI 和 SHEI 来看,平畈和缓丘区域均大于陡丘和低山区域,SHDI 值越大,说明斑块类型增加或各拼块类型在景观中呈均衡化趋势分布,SHEI 值越小,说明景观受到优势拼块类型所支配,平畈和缓丘区域各类斑块分布较均匀,而陡丘和低山区域景观受林地斑块所支配,耕地、水域斑块较少。1995—2015 年,平畈区域 SHDI 和 SHEI 均先增大后减小,说明 1995—2005 年建设用地的扩张使得景观分布更均衡,而 2005—2015 年建设用地的扩张降低了景观的均衡度;缓丘区域 SHDI 和 SHEI 持续增大,说明建设用地的扩张增加了各类斑块的均衡;陡丘和低山 SHDI 和 SHEI 也持续增大,说明建设用地对林地的占用,开始削弱林地的主导地位。

4 结论

(1) 1995—2015 年,大冶市建设用地扩张存在逐渐加速的趋势,并具有明显的空间异质性,平畈区域扩张强烈且所占比重不断增大,缓丘区域扩张较强但所占比重有减小的趋势,陡丘和低山区域受地形的影响,扩张较为缓慢。从扩张模式看,大冶市建设用地扩张以边缘式为主,填充式为辅,受地形条件影响,不同区域存在差异,平畈和缓丘区域边缘式扩张占有优势地位,但所占比重在减小,填充式和飞地式扩张开始增多,陡丘和低山区域边缘式、填充式和飞地式扩张数量则一直差异不大。

(2) 考虑三维地形的影响,从地形起伏度和坡向两个角度,对生态系统服务基准单价进行修正,能够更为客观和准确地反映不同地形部位生态系统的服务价值。根据修正后的生态系统服务价值模型测算得到,大冶市 1995—2015 年建设用地扩张带来的生态服务价值总损失为 37 525.56 万元,平畈和缓丘区域因建设用地扩张占地比例大,所以总损失也大,而缓丘和低山区域占用林地比例较高,故单位建设用地扩张代价更高。从 1995—2005 年、2005—2015 年两个阶段看,平畈区域因占用水域比例有所提高导致单位面积建设用地扩张造成的损失加大,而缓丘区域则

由于占用耕地的比例开始提高,而占用林地的比例有所降低,单位面积建设用地扩张造成的损失减小。

(3) 从 1995 年、2005 年、2015 年的三维景观格局指数变化看,大冶市建设用地扩张导致各类地貌区域的景观破碎程度均持续增加。在平畈和缓丘区域,新增建设用地与原有建设用地的连通性在开始改善,但平畈区域的景观均衡性从前期的增强变为后期的减弱,缓丘区域的景观均衡性则持续增强;在陡丘和低山区域,新增建设用地团聚程度低,林地的主导地位开始削弱。

参考文献:

- [1] 陈江龙,高金龙,徐梦月,等.南京大都市区建设用地扩张特征与机理[J].地理研究,2014,33(3):427-438.
- [2] 张童,陈爽,李广宇,等.基于 GWR 的城市扩张下生物量损失与城市形态格局的关系研究[J].生态环境学报,2016,25(12):1891-1898.
- [3] 武鹏飞,王茂军,张学霞.基于归一化建筑指数的北京市城市热岛效应分布特征[J].生态环境学报,2009,18(4):1325-1331.
- [4] 中国科学院地理研究所.中国 1:1000000 地貌图制图规范(试行)[M].北京:科学出版社,1987:33.
- [5] 《湖北农业地理编写组》.湖北农业地理[M].武汉:湖北人民出版社,1980:16-21.
- [6] 郎玲玲,程维明,朱启疆,等.多尺度 DEM 提取地势起伏度的对比分析:以福建省低山丘陵区为例[J].地球信息科学,2007,9(6):1-6,136.
- [7] 李志林,朱庆.数字高程模型[M].武汉:武汉大学出版社,2003:216-217.
- [8] 武鹏飞,周德民,宫辉力.一种新的景观扩张指数的定义和实现[J].生态学报,2012,32(13):4270-4277.
- [9] Costanza R, D'Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. World Environment, 1997,387(6630):253-260.
- [10] 谢高地,张彩霞,张昌顺,等.中国生态系统服务的价值[J].资源科学,2015,37(9):1940-1946.
- [11] 陈万旭,李江风,姜卫,等.豫西山区土地利用变化对生态服务价值的影响[J].水土保持研究,2018,25(1):376-381.
- [12] 程建,程久苗,吴九兴,等.2000—2010 年长江流域土地利用变化与生态系统服务功能变化[J].长江流域资源与环境,2017,26(6):894-901.